

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-137698

(43)Date of publication of application : 14.05.2003

(51)Int.Cl. C30B 29/38  
H01F 10/193  
H01L 33/00  
H01L 43/08  
H01S 5/323

(21)Application number : 2001-329166

(71)Applicant : ULVAC JAPAN LTD

(22)Date of filing : 26.10.2001

(72)Inventor : SHIMIZU SABURO  
SONODA SAKI

## (54) III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR MATERIAL

### (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a III-V dilute magnetic semiconductor exhibiting ferromagnetism at normal temperature.

SOLUTION: Manganese and oxygen are incorporated into GaN in an amount of 0.5 to 15 atom.% and a concentration of  $1 \times 10^{18}$  to  $3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ . The incorporated Mn forms a shallow acceptor level, and the GaN becomes a p-type semiconductor. The obtained GaN exhibits ferromagnetism at room temperature. It is possible to incorporate silicon in place of oxygen or to incorporate silicon together with oxygen.

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

57

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-137698

(P2003-137698A)

(43)公開日 平成15年5月14日(2003.5.14)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード*(参考)
C 3 0 B 29/38		C 3 0 B 29/38	D 4 G 0 7 7
H 0 1 F 10/193		H 0 1 F 10/193	5 E 0 4 9
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 5 F 0 4 1
43/08		43/08	M 5 F 0 7 3
H 0 1 S 5/323	6 1 0	H 0 1 S 5/323	6 1 0
審査請求 未請求 請求項の数3 O L (全 9 頁)			

(21)出願番号 特願2001-329166(P2001-329166)

(22)出願日 平成13年10月26日(2001.10.26)

(71)出願人 000231464

株式会社アルバック

神奈川県茅ヶ崎市萩園2500番地

(72)発明者 清水 三郎

神奈川県茅ヶ崎市萩園2500番地 株式会社  
アルバック内

(72)発明者 園田 早紀

神奈川県茅ヶ崎市萩園2500番地 株式会社  
アルバック内

(74)代理人 100102875

弁理士 石島 茂男 (外1名)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 III-V族半導体材料

(57)【要約】

【課題】 常温で強磁性を示すIII-V族希薄磁性半導体を提供する。

【解決手段】 GaNに、Mnと酸素を、それぞれ0.5～15at%の範囲と $1 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{20}$ 個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の範囲で含有させる。Mnが浅いアクセプタレベルを形成し、GaNがp型を示す。このGaNは室温において強磁性を示す。酸素に替えてシリコンを含有させたり、又は酸素と共にシリコンを含有させてもよい。

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族半導体材料であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、酸素原子を $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $3 \times 10^{20}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族半導体材料。

【請求項 2】 III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族半導体材料であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、シリコン原子を $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $9 \times 10^{19}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族半導体材料。

【請求項 3】 III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族半導体材料であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、酸素原子とシリコン原子を、合計の量が、 $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $3 \times 10^{20}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族半導体材料。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、希薄磁性半導体を成長させる技術にかかり、特にGaやIn等のIII族金属を主成分とし、磁性金属としてMnを主成分として含むIII族窒化物希薄磁性半導体に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】近年では、金属多層膜における巨大磁気抵抗効果を利用した素子が実用に供されており、磁気センサや磁気ランダムアクセスメモリの研究も盛んに行われている。更に、磁性体と半導体の複合構造や、希薄磁性半導体などの新材料のエレクトロニクスへの応用も研究されている。ここで、希薄磁性半導体とは、非磁性半導体と磁性原子の混晶半導体であって、通常、磁性原子の濃度20 at %以下のものを指している。

【0003】希薄磁性半導体としては、強磁性を示す物質として、既にGaAs:Mn、InAs:Mn、CdTe:Mnなどが実現されており、GaAs:Mnにおいては、これをp層としてn-GaAsとの接合で発光ダイオードが作製されている。この発光ダイオードをGaAs:Mn層のキュリー温度以下にして電流を流し、発光させると、その発光がスピン偏極電流に基づく円偏光成分をもつことが確認されている。これは、スピン偏極した電流がpn接合に流れたことを示している(H. Ohno et al., NATURE vol. 402, 1999)。

【0004】しかし、現在までに報告されている閃亜鉛鉱型III-V族希薄磁性半導体のキュリー温度は100

K以下である。

【0005】これに対し、ワイドギャップ半導体であるGaNを母材とした場合には、Mn、V、Crを磁性不純物として含めると強磁性を発現し、そのキュリー温度は室温を超えるという予測がなされている。特に、Mnを添加した場合には、得られたGaN:Mn膜がp型を示すと室温において強磁性になるという予測がある(T. Dietl et al., Science 287, 1019 (2000))。

【0006】しかし、これまでRF励起窒素プラズマを用いてGaN:Mnの成長が試みられているが、室温において強磁性を発現するに至っていない。

## 【0007】

【発明が解決しようとする課題】本発明は上記従来技術の不都合を解決するために創作されたものであり、その目的は、室温で動作可能な希薄磁性半導体を提供することにある。

## 【0008】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、請求項1記載の発明は、III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族希薄磁性半導体であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、酸素原子を $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $3 \times 10^{20}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族希薄磁性半導体である。請求項2記載の発明は、III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族希薄磁性半導体であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、シリコン原子を $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $9 \times 10^{19}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族希薄磁性半導体である。請求項3記載の発明は、III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族希薄磁性半導体であって、マンガンを0.5 at %以上15 at %以下の範囲で含有し、酸素原子とシリコン原子を、合計の量が、 $1 \times 10^{18}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以上 $3 \times 10^{20}$  個 $\text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲で含有するIII-V族希薄磁性半導体である。

【0009】通常、III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII族窒化物半導体は、ノンドーブではn型の電気伝導を示す。

【0010】III族元素としてガリウムを主成分とし、V族元素として窒素を主成分とするIII-V族化合物半導体(III族窒化物半導体)の作成において、磁性元素であるマンガンを経済成長中のIII-V族化合物半導体に単独で添加すると、添加されたマンガンはIII-V族化合物半導体中で深いアクセプターレベルを形成するため、添加されたマンガンは残留不純物である電子をトラップする。その結果、得られたIII-V族化合物半導体は室温において強磁性を示すことなく高抵抗膜となってしまう。

【0011】それに対し、本発明方法は、真空雰囲気中

で成長途中のIII-V族化物半導体結晶に磁性元素であるマンガンを、n型ドーパントである酸素又はシリコンのいずれか一方又は両方を添加している。そして、マンガンを含有し、且つ、酸素又はシリコンのいずれか一方又は両方を含有するIII-V族化物半導体結晶を得ている。添加物の濃度は下記の通りである。

【0012】(1)マンガンの含有量……0.5at%以上15at%以下の範囲

(2)酸素濃度…… $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  個以上  $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  個以下の範囲

(3)シリコン濃度…… $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  個以上  $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  個以下の範囲

(4)酸素原子とシリコン原子の合計の濃度…… $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  個以上  $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  個以下

【0013】その結果、本発明のIII-V族化物半導体結晶は、マンガンを単独で添加した場合よりもアクセプターレベルが浅くなり、室温において強磁性を示すp型のIII-V族化物半導体結晶(GaN:Mn)が得られる。

【0014】

【発明の実施の形態】先ず、本発明の第一の実施例を説明する。図1の符号10は、本発明のIII-V族半導体材料の一例であるIII-V族希薄磁性半導体を製造できる成膜装置(分子線エピタキシー(MBE)装置)を示している。

【0015】この成膜装置10は真空槽11を有しており、その底壁側には、第1、第2の蒸発源14、15が配置されており、壁面には、酸素ガス導入ノズル12と、アンモニアガス導入ノズル13とが取り付けられている。真空槽11の天井側には、ヒータ17が配置されている。

【0016】第1、第2の蒸発源14、15の内部には、Gaを主成分とする第1の金属材料36と、Mnを主成分とする第2の金属材料37とがそれぞれ配置されている。

【0017】まず、真空槽11内部を真空雰囲気にし、真空雰囲気を維持しながらサファイアから成る成膜対象の基板21を、真空槽11の底壁側に向けてヒータ17の近傍に配置し、その状態で、ヒータ17に通電して発熱させ、基板21を昇温させる。

【0018】基板21が950℃に達し、その温度で15分間維持すると、基板21の表面が清浄化される。

【0019】清浄化の終了後、500℃まで降温させ、アンモニアガス導入ノズル13からアンモニアガスを噴出させ、真空槽11内にアンモニアガスを導入する。

【0020】アンモニアガスの導入とともに、第1の蒸発源14内に配置された第1の金属材料36を加熱し、Gaを主成分とする金属分子線(Gaを主成分とする金属材料36の蒸気)を発生させて基板21表面にGaN層を成膜し、次いで、600℃で15分加熱して単結晶

化し、図2(a)に示すように、基板21上にバッファ層22を形成した。

【0021】成膜条件は、アンモニアガスの流量5~100sccm、第1の蒸発源の温度850~950℃の範囲であり、形成したバッファ層22の厚さは0.1~1μmであった。

【0022】次に、基板21を620℃に昇温させ、アンモニアガス導入ノズル13によってバッファ層22表面にアンモニアガスを直接吹き付け、熱分解させるとともに、第1、第2の蒸発源14、15内の第1、第2の金属材料36、37を加熱し、Gaを主成分とする分子線と、Mnを主成分とするものをバッファ層22表面に向けて照射するとともに、酸素ガス導入ノズル12から酸素ガスを吹き付けて酸素のドーピングを行い、図2(b)に示すように、バッファ層22表面にGaN:Mnの薄膜から成るIII-V族希薄磁性半導体23を形成した。

【0023】このIII-V族希薄磁性半導体23中では、添加された酸素はキャリアとして電子を放出するため、酸素はn型のドーパントになる。

【0024】比較例とし、上記III-V族希薄磁性半導体23とは別に、第2の蒸発源15からはMn蒸気を発生させず、第1の蒸発源14の温度を900℃としてGa蒸気を発生させ、アンモニアガスの流量を5sccmに設定し、酸素を添加しながらGaN膜を成長させた場合の、GaN膜中の酸素流量とキャリア濃度の関係を測定した。図3は、その関係を示すグラフである。

【0025】図3から分かるように、酸素流量の増加とともに電子濃度が増加している。この電子濃度は、SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)を用いて測定した酸素濃度とほぼ一致した。

【0026】また、第1の蒸発源14の温度900℃とし、アンモニアガスの流量を5sccmに設定し、第2の蒸発源15の温度を475~630℃で変化させMn濃度0.5, 3, 7, 15at%のGaN:Mn膜から成る本発明のIII-V族希薄磁性半導体23をバッファ層22上に形成した。このIII-V族希薄磁性半導体23について酸素濃度とキャリア濃度の関係を測定した。

【0027】図4はその関係を示すグラフである。この膜中のMn濃度はEPMA(Electron Probe Micro Analyzer)で測定し、酸素濃度はSIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)によって測定した。

【0028】0.5~15at%の各Mn濃度の希薄磁性半導体薄膜でも、酸素濃度が低いときは高抵抗膜で導電型の判定は困難であるが、酸素濃度の増加とともにp型を示すようになり、さらに酸素濃度を増加させると再びn型になった。これは酸素ドーピングによる電子濃度の増加とともに、Mnアクセプター準位が浅くなり、ホール濃度が増加するためと考えられる。このことから、Mnとともに酸素を添加するとp型のGaN:Mn膜が得られることが明らかになった。

10

20

30

40

50

【0029】GaN:Mn膜の導電型がp型を示すMn濃度を求めるため、第1の蒸発源14の温度を850～950℃の範囲、第2の蒸発源15の温度を475～630℃の範囲、アンモニアガスの流量を5～100 sccmの範囲、酸素ガスの流量を0.001～0.2 sccmの範囲で変化させて、膜厚0.1～1 μmの酸素ドーピングGaN:Mn膜を成長させた。

【0030】図5のグラフにキャリア濃度とMn濃度の関係を示す。符号Lで示す斜線部分の領域がp型を示す領域である。このとき、アンモニアガス流量依存性は観

察されなかった。  
【0031】次に、得られたp型のGaN:Mn膜に対し、室温でSQUIDを用いて磁気測定を行ったところ、すべて強磁性を示した。図6のグラフの符号Aは、Mn濃度7%の試料のM-H曲線であり、符号Bは、0.5%の試料のM-H曲線である。

【0032】次に、本発明の第二の実施例について説明する。この第二の実施例では、RF励起の窒素プラズマを窒素源とした分子線エピタキシー(MBE)法によって下記のようにGaN:Mn膜を作製する。

【0033】図7の符号40は、第二の実施例に用いる成膜装置(MBE装置)を示している。この成膜装置40は真空槽41を有しており、その底壁側には、第1、第2の蒸発源44、45が配置されており、壁面には、RFプラズマ源43と、酸素ガス導入ノズル42とが配置されている。

【0034】第1、第2の蒸発源44、45内には、それぞれGaを主成分とする第1の金属材料66と、Mnを主成分とする第2の金属材料67が配置されている。

【0035】真空槽41の天井側には、ヒータ47が配置されており、そのヒータ47の近傍には、成膜対象であるサファイアから成る基板51が、成膜面を底壁側に向けて配置されている。

【0036】その状態でヒータ47に通電して発熱させ、基板51を950℃に加熱して清浄化した後、500℃まで降温させ、RFプラズマ源43から窒素プラズマを噴出させるとともに、第1の蒸発源44内の第1の金属材料66を加熱し、Gaを主成分とする金属分子線(Gaを主成分とする金属材料66の蒸気)を発生させ、基板51の表面にGaN層を成膜し、次いで、600℃で15分加熱し、単結晶化し、図8(a)に示すように、基板51上にバッファ層52を形成した。

【0037】成膜条件は、窒素ガス流量が0.5～3 sccm、RFプラズマ源43への投入電力が350W、第1の蒸発源44の温度が850～950℃の範囲であった。形成されたバッファ層の厚さは0.1～1 μmであった。

【0038】その後、基板51を620℃に昇温させ、RFプラズマ源43によってバッファ層52表面に窒素プラズマを照射するとともに、第1、第2の蒸発源4

4、45内の第1、第2の金属材料66、67を加熱し、それぞれGaを主成分とする分子線とMnを主成分とする分子線とをバッファ層52表面に向けて照射すると共に、酸素ガス導入ノズル42から酸素ガスを吹き付け、バッファ層52表面に、酸素がドーピングされたGaN:Mn薄膜からなるIII-V族希薄磁性半導体53を形成した。

【0039】上記成膜装置40により、窒素ガス流量を3 sccmとし、RFプラズマ源43への投入電力350Wとし、第1の蒸発源の温度900℃とし、第2の蒸発源の温度を475～630℃の範囲で変化させて第二の実施例の希薄磁性半導体膜53(GaN:Mn膜)を成長させた。そのIII-V族希薄磁性半導体53について、キャリア濃度と酸素流量との関係を測定した。

【0040】Mn濃度0.5, 5, 10, 15 at%の4種類のGaN:Mn薄膜から成る希薄磁性半導体膜III-V族希薄磁性半導体53を測定対象とした。測定結果を図9のグラフに示す。

【0041】膜中のMn濃度はE PMA (Electron Probe Micro Analyzer)で測定した値であり、酸素濃度はSIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)で測定した値である。

【0042】酸素濃度が低いときは高抵抗膜であり、導電型の判定は困難であるが、各Mn濃度のIII-V族希薄磁性半導体53において、酸素濃度の増加とともにp型を示すようになり、さらに酸素濃度を増加させると再びn型になっている。

【0043】そこで、第1の蒸発源の温度を850～950℃にし、第2の蒸発源の温度を475～630℃にし、窒素ガスの流量0.5～3 sccmにし、RFプラズマ源43への投入電力を350Wにし、酸素ガスの流量を0.001～0.2 sccmにして膜厚0.1～1 μmの酸素がドーピングされたGaN:Mn膜から成るIII-V族希薄磁性半導体53を各種形成し、p型領域となる範囲を調べた。

【0044】図10のグラフにMn濃度とキャリア濃度の関係を示す。符号Mで示す斜線部分の領域がp型を示す領域である。このとき、RFプラズマ源43に導入した窒素ガスの流量には依存しなかった。

【0045】上記のp型を示すGaN:Mn膜について室温でSQUIDを用いて磁気測定を行ったところ強磁性を示した。

【0046】次に、本発明の第三の実施例を説明する。この第三の実施例では、RF励起の窒素プラズマを窒素源とした分子線エピタキシー(MBE)法を用い、下記のようにGaN:Mn膜を作製する。

【0047】図11の符号70は、第三の実施例に用いる成膜装置(MBE装置)を示している。

【0048】この成膜装置70は真空槽71を有しており、その底壁側には、RFプラズマ源72と、第1、第

2、第3の蒸発源73、74、75とが配置されている。

【0049】第1の蒸発源73内には、Gaを主成分とする第1の金属材料77が配置されており、第2の蒸発源74内には、Mnを主成分とする第2の金属材料78が配置されており、第3の蒸発源75内には、シリコン79が配置されている。

【0050】真空槽71の天井側には、ヒータ77が配置されており、まず、成膜対象であるサファイアから成る基板81を、真空槽71の底壁側に向けてヒータ77近傍に配置し、その状態で、ヒータ77に通電して発熱させ、基板81を950℃に加熱して清浄化した後、500℃まで降温させてRFプラズマ源72から窒素プラズマを噴出させるとともに、第1の蒸発源73内の第1の金属材料77を加熱し、Gaを主成分とする金属分子線(Gaを主成分とする金属材料77の蒸気)を発生させて基板81表面に、GaN層を成膜し、次いで、このGaN層を600℃で15分加熱し、単結晶化して図12(a)に示すように、バッファ層82を形成した。

【0051】成膜条件は、窒素ガスの流量0.5~3sccm、RFプラズマ源72の投入電力350W、第1の蒸発源77の温度850~950℃の範囲であった。形成したバッファ層の厚さは0.1~1μmであった。

【0052】次いで、サファイア基板81を620℃に昇温させ、RFプラズマ源72によってバッファ層82表面に窒素プラズマを照射するとともに、第1、第2、第3の蒸発源73、74、75内の第1、第2、第3の金属材料77、78、79を加熱し、それぞれGaを主成分とする分子線と、Mnを主成分とする分子線と、シリコンの分子線とをバッファ層82表面に向けて照射し、バッファ層82表面にシリコンが添加されたGaN:Mn薄膜から成るIII-V族希薄磁性半導体83を形成した。

【0053】上記III-V族希薄磁性半導体23とは別に、第2の蒸発源15からはMn蒸気を発生させず、窒素ガス流量を3sccmとし、RFプラズマ源72への投入電力を350Wとし、第1の蒸発源77の温度を900℃とし、第3の蒸発源79の温度を1100~1200℃の範囲で変化させて成長させたGaN膜中の電子濃度を図13のグラフに示す。

【0054】シリコンの添加によりn型キャリアである電子濃度が増加することがわかる。また、電子濃度は、SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)により測定したシリコン濃度とほぼ一致していた。

【0055】次に、窒素ガス流量を3sccmとし、RFプラズマ源投入電力350Wとし、第1の蒸発源77の温度を900℃とし、第2の蒸発源78の温度を475~630℃の範囲で変化させ、第3の蒸発源79の温度1100~1200℃の範囲で変化させて成長させ、バッファ層82上に希薄磁性半導体薄膜III-V族希薄

磁性半導体83(GaN:Mn膜)を形成した。このIII-V族希薄磁性半導体83のシリコン濃度とキャリア濃度の関係を図14に示す。ここでは、Mn濃度、0.5、5、10、15at%の4種類のGaN:Mn膜から成るIII-V族希薄磁性半導体83を測定対象とした。

【0056】膜中のMn濃度はEPMA(Electron Probe Micro Analyzer)で測定した値であり、シリコン濃度はSIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)によって測定した値である。

【0057】各Mn濃度のIII-V族希薄磁性半導体83において、シリコン添加量が少ないときには高抵抗膜であって導電型の判定は困難であるが、添加量の増加とともにp型を示すようになった。

【0058】そこで、RFプラズマ源投入電力350Wに設定し、第1の蒸発源73の温度を850~950℃の範囲、第2の蒸発源74の温度を475~630℃の範囲、第3の蒸発源75の温度を1100~1200℃の範囲、窒素ガスの流量を0.5~3sccmの範囲で変化させ、膜厚0.1~1μmのシリコンドープGaN:Mn膜から成るIII-V族希薄磁性半導体83をバッファ層82上に成長させ、p型領域となる範囲を調べた。

【0059】図15のグラフに、Mn濃度とキャリア濃度の関係を示す。符号Nで示す斜線部分の領域がp型を示す領域である。このとき、RFプラズマ源72に導入する窒素ガスの流量には依存しなかった。

【0060】次に、p型を示すGaN:Mn膜について室温SQUIDを用いてこれらの膜の磁気測定を行ったところ強磁性を示した。

【0061】以上は、サファイアを基板として用いた例を示したが、SiC、GaN、Si、GaAs等を基板として用いてもよい。

【0062】また、上記実施例ではアンモニアガスを使用した。アンモニアガスに替えヒドラジンガスを使用してもよい。

【0063】実施例1~3では、MBEによってGaN:Mn薄膜を作成したが、有機金属気相成長法(MOCVD)によって形成してもよい。

【0064】また、実施例1~3では薄膜結晶を作成したが、チョクラルスキー法などにより希薄磁性半導体のバルク単結晶を作成する場合にも本方法は有効である。

【0065】以上のようにして形成された本発明の希薄磁性半導体は、所望のタイプの電子デバイス、光電子デバイス、アイソレータ、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)などに組み込むことができる。

【0066】得られた希薄磁性半導体薄膜は実用的なキャリア濃度を持つp型を示すため、強磁性膜としてではなく、パイポーラトランジスタ、発光ダイオード、レーザ等のp型層として用いることも十分可能である。

## 【0067】

【発明の効果】本発明によれば、既存の希薄磁性半導体薄膜では不可能であった室温強磁性を持ち、室温において動作する希薄磁性半導体薄膜を構成要素とするデバイスの作製が可能になる。特に、MBEを使用し、本発明の半導体材料を成長させた場合は、成長後の加熱処理などを行わなくても室温において強磁性を発現する希薄磁性半導体薄膜が得られる。

## 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第一の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の形成に用いた成膜装置

【図2】(a)、(b)：第一の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の製造工程

【図3】マンガンを含む比較例のIII-V族希薄磁性半導体の酸素流量とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図4】第一の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の酸素流量とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図5】第一の実施例のIII-V族希薄磁性半導体のMn濃度とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図6】そのIII-V族希薄磁性半導体のSQUIDに \*

## \* よる磁気測定結果

【図7】本発明の第二の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の形成に用いた成膜装置

【図8】(a)、(b)：第二の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の製造工程

【図9】第二の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の酸素流量とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図10】第二の実施例のIII-V族希薄磁性半導体のマンガン濃度とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図11】本発明の第三の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の形成に用いた成膜装置

【図12】(a)、(b)：第三の実施例のIII-V族希薄磁性半導体の製造工程

【図13】第三の実施例のIII-V族希薄磁性半導体のシリコンソースの温度と電子濃度の関係を示すグラフ

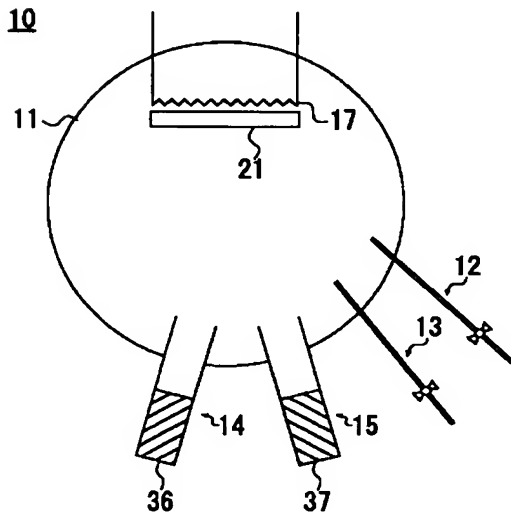
【図14】第三の実施例のIII-V族希薄磁性半導体のシリコン濃度とキャリア濃度の関係を示すグラフ

【図15】第三の実施例のマンガン濃度とキャリア濃度の関係を示すグラフ

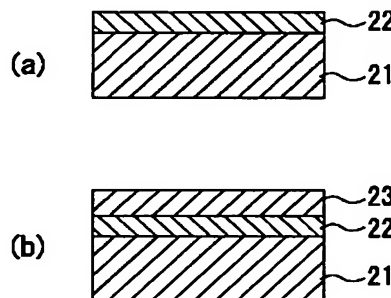
【符号の説明】

23、53、83……III-V族希薄磁性半導体

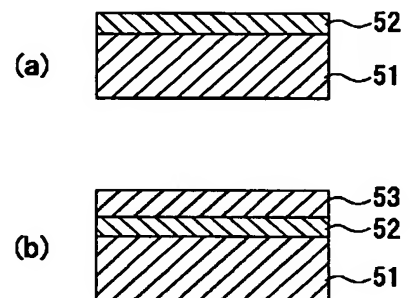
【図1】



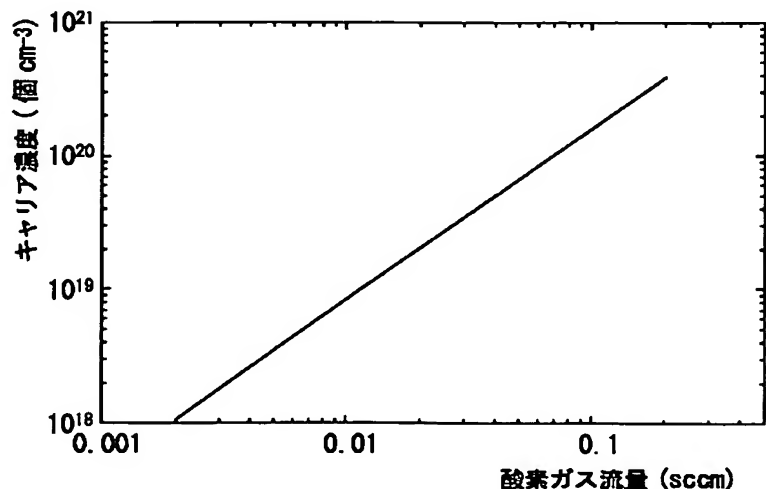
【図2】



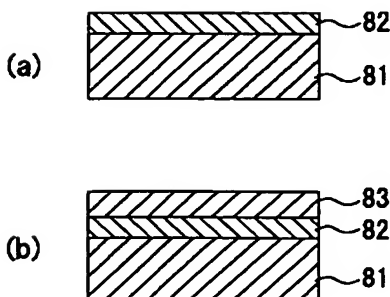
【図8】



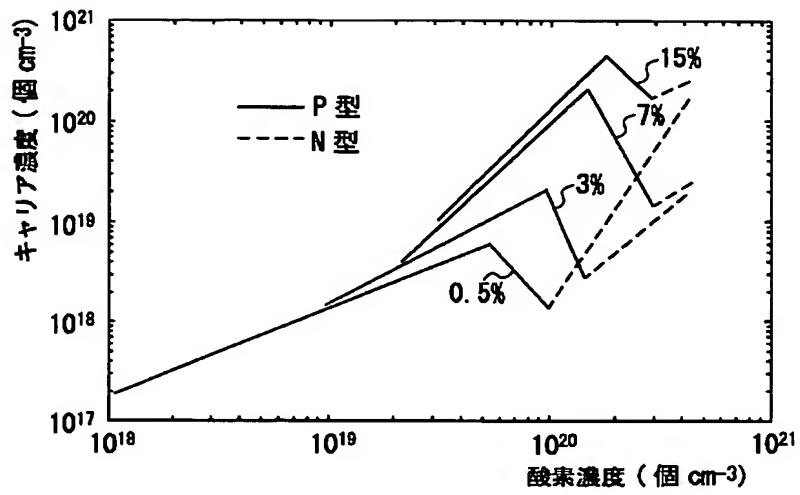
【図3】



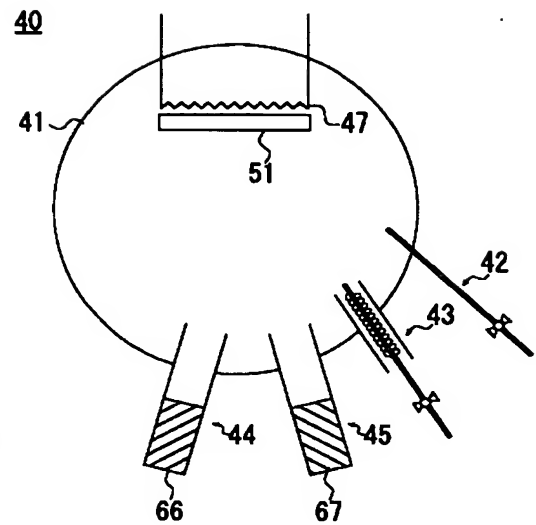
【図12】



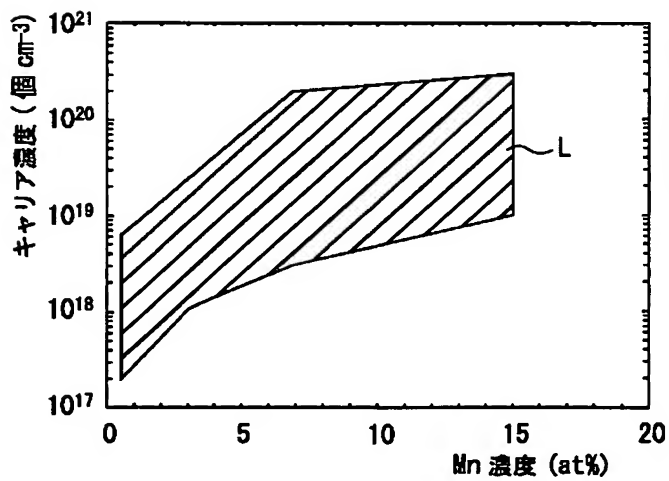
【図 4】



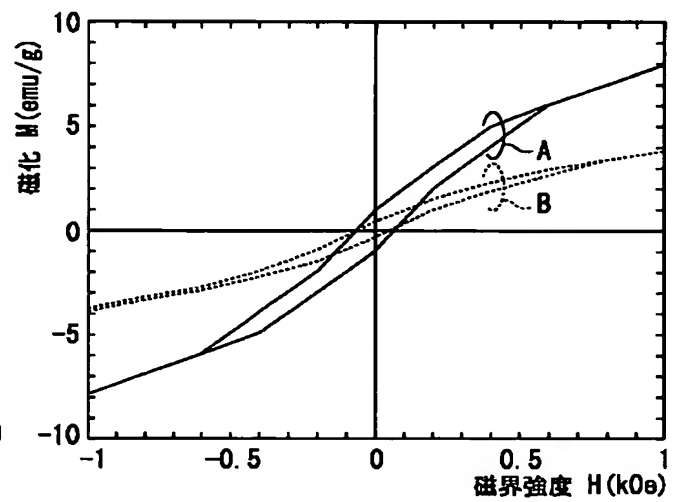
【図 7】



【図 5】

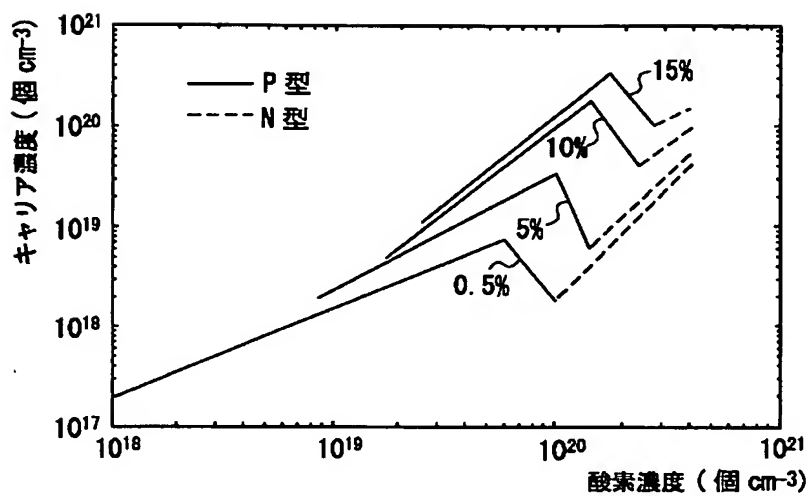


【図 6】

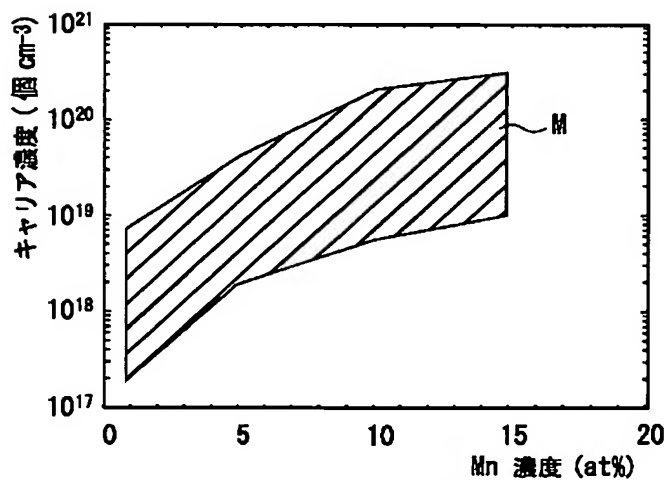




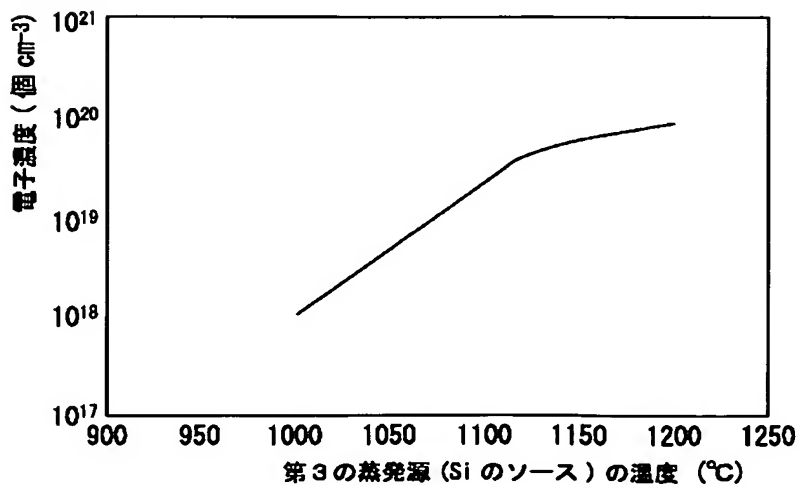
【図9】



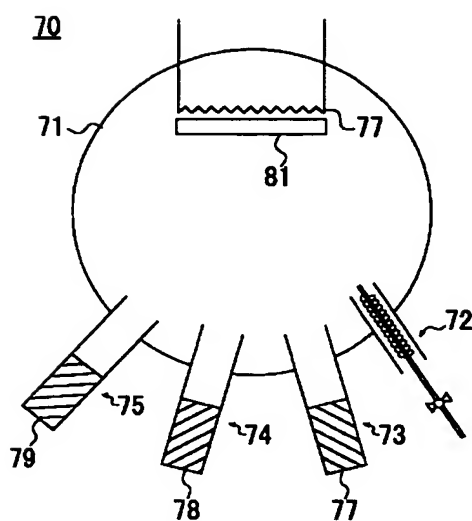
【図10】



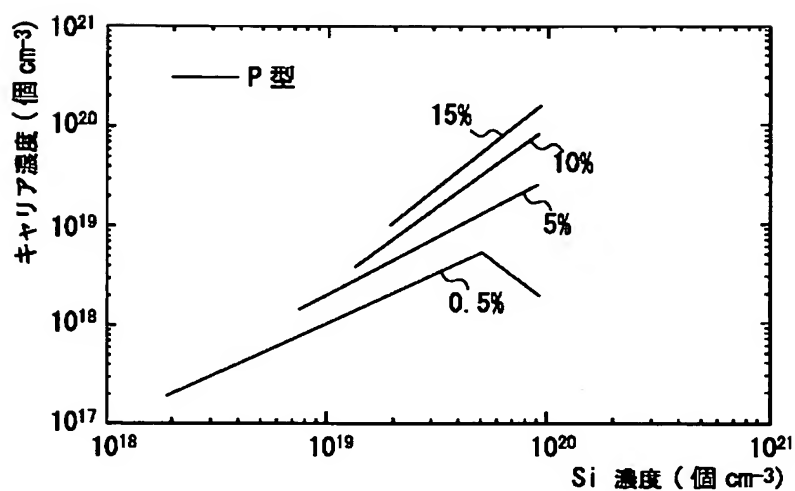
【図13】



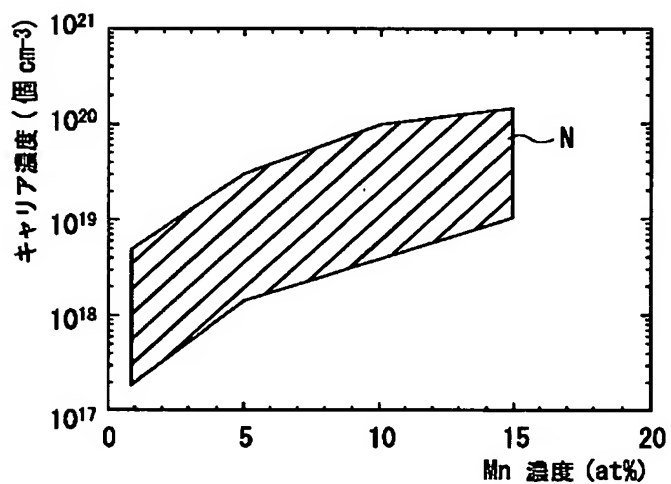
【図11】



【図14】



【図15】



フロントページの続き

F ターム(参考) 4G077 AA03 BE15 DA05 EB01 EF03  
 HA03 HA06 HA20 SC02 SC08  
 5E049 AA10  
 5F041 AA14 CA40 CA54 CA57 CA66  
 CA77  
 5F073 CA01 DA06 DA11 EA29